

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 200334011

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

代表性海区好氧不产氧光合细菌
的光合基因 (*pufM*) 生态分布特征

Genetic Distribution of Aerobic Anoxygenic Photosynthetic
Bacteria Based on *pufM* Gene in Representative Marine
Environments

胡 耀 华

指导教师姓名: 焦念志 教授

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2006 年 8 月

论文答辩日期: 2006 年 9 月

学位授予日期: 2006 年 12 月

答辩委员会主席: 郑天凌 教授

评 阅 人: 李瑞香 研究员

杨宇峰 教授

2006 年 9 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

目 录

中文摘要.....	VI
英文摘要.....	VIII
第一章 前言.....	1
1.1 好氧不产氧光合细菌的研究进展.....	1
1.2 海洋环境微生物遗传多样性的研究方法.....	13
1.3 本论文的研究思路、意义及内容.....	23
第二章 材料与方法.....	26
2.1 材料.....	26
2.2 基本方法.....	31
第三章 代表性海区 AAPB 光合基因多样性分析.....	38
3.1 代表性海区表层海水 AAPB 光合基因多样性分.....	38
3.1.1 台湾海峡厦门站位 (XM) AAPB 光合基因多样性分析.....	38
3.1.2 东海表层 (ECS-P6-s 站位) AAPB 光合基因多样性分析.....	40
3.1.3 北太平洋 Gyre (NPG-w24 和 NPG-w26 站位) AAPB 光合基因多样性分.....	43
3.1.4 东北太平洋 (NPO-pf1 站位) AAPB 光合基因多样性分析.....	43
3.1.5 白令海 (BS-br02 站位) AAPB 光合基因多样性分析.....	45
3.1.6 讨论.....	48
3.2 东海垂直剖面 (ECS-P6 站位) 透光度对 AAPB 光合基因多样性.....	
的影响分析.....	49
3.2.1 东海 50%透光层 (ECS-P6-8m) AAPB 光合基因多样性分.....	49
析.....	
3.2.2 东海 30%透光层 (ECS-P6-14m) AAPB 光合基因多样性分.....	51
析.....	
3.2.3 东海 30%透光层 (ECS-P6-35m) AAPB 光合基因多样性分.....	51
析.....	
3.2.4 透光度对 AAPB 光合基因多样性的影响分析.....	54

3.3 海区环境对 AAPB 光合基因各类群的分布及进化的影响.....	56
3.3.1 不同海区环境中属于 α -3 <i>Proteobacteria</i> AAPB 的 <i>pufM</i> 基因分布特征.....	56
3.3.2 不同海区环境中属于 α -4 <i>Proteobacteria</i> AAPB 的 <i>pufM</i> 基因分布特征.....	59
3.3.3 在有氧海区大量类似属于 γ - <i>Proteobacteria</i> AAPB 的 <i>pufM</i> 基因的发现.....	61
3.4 小结与讨论.....	68
第四章 实时荧光定量 PCR 定量海洋中 AAPB 的丰度.....	69
4.1 实时荧光定量 PCR 定量海洋环境中 AAPB 的丰度的意义.....	69
4.2 实时荧光定量 PCR 结果分析.....	70
4.2.1 环境样品DNA的得率.....	70
4.2.2 实时定量PCR扩增的特异性.....	71
4.2.3 标准曲线和qPCR的灵敏性.....	72
4.2.4 熔链曲线的分析.....	73
4.2.5 <i>pufM</i> 基因克隆文库的多样性分析.....	74
4.2.6 qPCR定量海洋环境中的AAPB丰度.....	76
4.3 讨论.....	80
第五章 结论与展望.....	81
5.1 结论.....	81
5.2 展望.....	82
参考文献.....	88
硕士期间完成的论文.....	89
致谢.....	90

CONTENTS

Chinese abstract.....	VI
English abstract.....	VIII
1. Foreword.....	1
1.1 The proceedings of Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria.....	1
1.2 Development of the methods and techniques of marine environmental microbiology.....	13
1.3 Design, purpose and contents of this thesis.....	23
2. Materials and methods.....	26
2.1 Materials.....	26
2.2 Methods.....	31
3. The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in representative marine environments.....	38
3.1 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in marine surface water.....	38
3.1.1 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in Xiamen Bay (XM station).....	38
3.1.2 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in East China Sea (ECS-P6-s station).....	40
3.1.3 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in north Pacific Gyre (NPG-w24 and NPG-w26station).....	43
3.1.4 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in eastern north Pacific Ocean (NPO-pf1 station).....	43
3.1.5 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in Bering Sea (BS-br02	

station).....	45
3.1.6 Discussion.....	48
3.2 The impact of light to the diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in a vertical profile in East China Sea (ECS-P6 station).....	49
3.2.1 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in the 50% I_0 layer (ECS-P6-8m).....	49
3.2.2 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in the 30% I_0 layer (ECS-P6-14m).....	51
3.2.3 The diversity of AAPB <i>pufM</i> gene in the 5% I_0 layer (ECS-P6-35m).....	51
3.2.4 The impact of light transparency to the diversity of AAPB <i>pufM</i> gene.....	54
3.3 The impact of environmental properties to the genetic distribution and evolution of AAPB <i>pufM</i> gene.....	56
3.3.1 The genetic distribution of <i>pufM</i> gene belonging to α -3 <i>Proteobacteria</i> AAPB.....	56
3.3.2 The genetic distribution of <i>pufM</i> gene belonging to α -4 <i>Proteobacteria</i> AAPB.....	59
3.3.3 Abundant presence of the γ -like <i>Proteobacterial</i> <i>pufM</i> gene in oxic seawater.....	61
3.4 Results and discussion.....	68
4. Real-time PCR for quantification of Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria based on <i>pufM</i> gene in marine environments.....	69
4.1 Introduction.....	69
4.2 Analysis of real-time quantitative PCR assay.....	70
4.2.1 Recovery rate of community DNA.....	70
4.2.2 Specificity of real-time quantitative PCR assay.....	71
4.2.3 Standard curve and sensitivity of this qPCR assay.....	72
4.2.4 Melting curve analysis of qPCR products.....	73
4.2.5 Diversity analysis of <i>pufM</i> clone library.....	74

4.2.6 Quantification of AAPB in marine environments.....	76
4.3 Discussion.....	80
5. Conclusions and perspectives.....	81
5.1 Conclusions.....	81
5.2 Perspectives.....	82
Reference.....	88
Papers published.....	89
Acknowledgement.....	90

摘 要

好氧不产氧光合细菌 (aerobic anoxygenic phototrophic bacteria, AAPB) 是海洋中新发现不久的一个重要的功能类群。它能利用 Bchl_a 的光合电子传递来减少对溶解有机碳的消耗, 其独特的生理功能在海洋碳循环中发挥着重要的作用。从系统发育分析来看, 目前海洋中发现的可培养的 AAPB 都属于变形细菌 α 纲, 基于环境序列的分析表明海洋中的未可培养细菌还存在类似变形细菌 β 纲的 AAPB。我们利用编码光反应复合中心小亚基的 *pufM* 基因来研究 AAPB 光合基因的生态分布。我们的取样海区包括厦门港, 长江口, 中国东海, 中国南海, 东北太平洋, 北太平洋 gyre 及白令海等海区, 在生态梯度上覆盖了温带、亚热带和寒带海区, 以及河口、陆架海和大洋海区。

我们发现类似于 *Roseobacter* 属 AAPB 的 *pufM* 序列广泛分布在各个海区, 它们是 AAPB 重要的组成部分。*Erythrobacter* 类群在我们所调查的海区整体丰度不高。海洋中未可培养的 AAPB 的 *pufM* 序列多样性大大多于可培养的类型。我们发现在海洋中存在大量类似属于变形细菌 γ 纲 AAPB 的 *pufM* 基因, 将海洋中 AAPB 的多态性从 α -*Proteobacteria* 和 β -*Proteobacteria*, 拓展到 γ -*Proteobacteria*。营养水平是控制 AAPB 光合基因多样性的重要的影响因子之一。营养水平越高的海区, AAPB 光合基因的 OTU 应该越低; 营养水平越低的海区, AAPB 光合基因的 OTU 应该越高。通过对陆架海 (东海 P6 站位) 垂直剖面的调查, 我们发现透光度对 AAPB 光合基因的多样性也具有明显的影响。不同的海区会衍生出相应的, 适应各自生态环境特点 (例如营养、光照) 的 AAPB 生态型。

我们还通过荧光实时定量 PCR 来定量海洋中 AAPB 的丰度。通过对扩增产物和熔链曲线的分析, 证明定量 PCR 对于 AAPB 定量有较高的特异性和灵敏性。在我们调查的海区, AAPB 的丰度的变化范围在 1.3×10^4 细胞/毫升到 3.4×10^5 细胞/毫升之间。从河口沿陆架海到开放外海的营养梯度上, AAPB 的丰度是逐渐降低的, 而且 AAPB 占总异养细菌的比例也呈现出同样的趋势。AAPB 的这种分布模式不符合原先人们认为 AAPB 更适合寡营养的环境的假设。

关键词: 好氧不产氧光合细菌, *pufM* 基因, 多样性, 营养水平, 透光度, 实时定量 PCR

ABSTRACT

Aerobic Anoxygenic Phototrophic Bacteria (AAPB) are a newly recognized functional group of microorganisms. They are obligate aerobe and the bacteriochlorophyll *a* (*BChl_a*) based photosynthesis is a supplement to their normal diet of dissolved organic carbon (DOC). Their unique physiological function is of potential great ecological importance in carbon cycling in the ocean. Known cultivated representatives of this functional group belong to only a few restricted groups within the α -class and β -class of *Proteobacteria*. Culture-independent environmental and genomic analyses of the photosynthetic gene content and operon organization identified the existence of β -like *Proteobacterial* AAPB. In order to clarify the significance and diversity of AAPB along ecological gradients based on analysis of *pufM* gene encoding the M subunit of anoxygenic photosynthetic reaction centers, we sampled in Xiamen Bay, Yangtze Estuarine, East China Sea, South China Sea, Eastern North Pacific Ocean, North Pacific Gyre and Bering Sea, covering temperate, subtropical, arctic zones and oceanic, continental shelf, and estuarine waters.

We detected that *Roseobacter-like* AAPB distributed widely in marine environments and occupied an important portion of AAPB. The abundance of AAPB belonging to *Erythrobacter* genus is not high in our investigated seawater. Planktonic bacterial assemblages contain multiple, distantly related, photosynthetically active bacterial groups, including some unrelated to known and cultivated types. And we newly discovered diverse γ *Proteobacterial-like* AAPB, extending the AAPB family from the known α -, β - to γ -*Proteobacterial* class. Trophic level is an important affecting factor of AAPB's genetic distribution. The higher is the trophic level, the less is the OTU of *pufM* gene. In the investigation of a vertical water column in shelf water (ECS-P6 station), we found that AAPB diversity showed a light-dependent distribution pattern. Thus, AAPB tend to develop niche-driven ecotypes according to marine environmental properties such as trophic level and light transparency.

We also developed a real-time quantitative PCR (qPCR) assay to specifically quantify AAPB in marine environments. High specificity and sensitivity for estimation of AAPB abundance were revealed by analysis of amplification products, melting curves and target sequences. The AAPB abundance was estimated to range from 1.3×10^4 cell/ml to 3.4×10^5 cell/ml in our tested samples by this qPCR assay. And the melting behavior could indicate predominant phenotypes in AAPB community in addition to validating the products of qPCR. Our results do not support previous proposal that AAPB are more abundant in oligotrophic environments. The abundance of AAPB is higher in coastal and continental shelf waters than in the oceanic waters. The abundance of AAPB decreased along the trophic level gradient, from estuarine, continental shelf to oceanic waters. And the ratio of AAPB to total heterotrophic bacteria takes on the same trend.

Keywords: aerobic anoxygenic phototrophic bacteria, *pufM*, diversity, trophic level, light transparency, real-time quantitative PCR

第一章 前言

1.1 好氧不产氧光合细菌的研究进展

几十年以来,人们普遍认为紫细菌的不产氧光合作用基本上是厌氧代谢过程,即它们在光照无氧条件下进行光合生长^[1]。不产氧光合作用装置的功能是将光能转化为横跨光合膜(PM)的电化学质子梯度,它被用于ATP的产生、主动运输、运动以及其他耗能过程。大部分光合紫细菌是兼性的,它们具有呼吸产能和光合产能两种能量代谢模式,而氧分压是调控它们光合系统合成和细胞分化的主要因素^[2]。好氧不产氧光合细菌是相对较近发现的一个生理类群,它能在有氧条件下进行不产生氧气的光合作用,却不能在厌氧条件下利用细菌叶绿素生长。尽管它们和厌氧光合细菌一样在细胞内含有细菌叶绿素,而且AAPB的光合系统与电子传递载体的组成,连同光反应中心(RC)的核酸序列和光捕获系统(LH)I的多肽序列,与厌氧的光合紫细菌都很相似,但是只有在有氧条件下AAPB才能进行有效的光诱导电子传递^[3]。分离出的AAPB纯系在实验室培养条件下都不能利用光作为唯一的能量来源。AAPB的大多数种类都是严格好氧的,它们只有在以有机物质作为碳源和能量来源时才能获得最好的生长。

1979年,第一个被报道的AAPB的成员——*Erythrobacter longus*^[4]在日本海湾被发现,它只在有氧和无光的条件下才能合成光合作用装置^[5]。从那开始,越来越多的AAPB从不同的生长环境被报道出来,从海洋到淡水,从酸性矿的排水系统到土壤,从盐湖到碱性湖泊^[6]。这个日益增长的细菌类群有以下的显著特点:(1)能在有氧的条件下通过*BChl a*将光能转化成电化学能;(2)光反应中心的电子受体具有很高的中点电位;(3)单细胞里相对较少的光合单位;(4)光抑制*BChl a*的合成;(5)细胞内含有大量的类胡萝卜素;(6)厌氧条件下不能进行光合生长^[3,7]。

AAPB在海洋中广泛分布,在海洋特别是贫营养的大洋环境的生物量中占有重要份额。而海洋占地球表面积的71%,是地球上最大的碳库,所以AAPB在全球碳循环中占有举足轻重的地位。人们已认识到,海洋初级生产力不仅仅是由浮游植物通过产氧光合作用机制来实现,海洋细菌所拥有的不产氧光合作用的贡献也不可或缺。不产氧光合作用包括厌氧不产氧光合作用和好氧不产氧

光合作用两种模式，前者在整个海洋碳循环中的作用相对较小，而后者则拥有广阔的空间。海洋AAPB在全球碳循环中扮演着独特的角色^[8]，具有重要的生态学意义。AAPB研究的焦点在于它们的多样性、丰度和在海洋中的分布，它们的生态学角色，以及它们在全球碳循环中的可能贡献。

1.1.1 AAPB 生长环境 (habitats)

Shiba 等人首次在 Tokyo 湾中发现了含有 *Bchl a* 的专性好氧细菌，用富集培养基从有氧的海洋环境中分离得到 16 株含有 *Bchl a* 的粉红或橙色的好氧细菌^[4]。后续的研究不断扩大着 AAPB 分布的地理区域及生态位。AAPB 种主要集中在五个生态系统：(1) 表层海水和深海热液口；(2) 内陆的盐湖；(3) 河水；(4) 淡水的热泉；(5) 土壤（表 1-1）。

其中最不同寻常的发现是从太平洋 Juan de Fuca Ridge 的黑烟囱热液喷口处分离出来属于 *Citromicrobium bathyomarinum* 的 AAPB 菌株 JF-1^[9]。在从深海 2000m 处采集回来的水样中，每毫升约含有 20~40 个 AAPB 细胞。JF-1 是一株黄色的耐盐、耐 pH、耐热菌，它的培养盐度、温度以及 pH 耐受范围很宽。有科学家尝试从远离深海热液喷口的表层海水分离得到它，但是至今还没有得到可培养的细胞，在相应的海区也没有得到类似于 *C. bathyomarinum* 的 16S rRNA 序列。这些结果揭示了尽管 IRFRR 荧光计显示表层海水中存在着大量的 AAPB^[8,10]，但是 *C. bathyomarinum* 只适宜生活在深海中。很难想象在无光的深海还存在含有 *Bchl a* 的 AAPB，有可能 JF-1 能利用热液区的远红外能来进行光合电子传递。

一些不含 *Bchl a* 的 *Roseovarius tolerans* 菌株在经过 6 年实验室培养后开始产生 *Bchl a*^[11]。这种在实验室培养下的不寻常的转变揭示了在 AAPB 中也许存在一些现在尚未知的因素影响光合基因的启动，这也说明了可能有一些 AAPB 成员由于它们可变的或者过低的 *BChl a* 表达量而被忽略。

表 1-1 最近报道的 AAPB 属的主要特征

Table.1.1 Determinative characteristics of recently described genera of AAPB

Genus (described by)	Habitat and site of isolation	Color	Cell shape	<i>In vivo</i> BChl peaks (nm)
<i>Acidisphaera</i> (Hiraishi et al. 2000)	Acidic hot springs and acid mine drainage, Japan	Pink to salmon-pink	Cocci to short ovoid rods	801, 874 ^a
<i>Citromicrobium</i> (Yurkov et al. 1999)	Deep ocean hydrothermal vent plume waters, Pacific Ocean	Citron yellow	Pleomorphic	800, 867 ^b
<i>Craurococcus</i> (Saitoh et al. 1998)	Soil, Tokyo, Japan	Pink	Cocci	800, 872 ^b
<i>Paraeraurococcus</i> (Saitoh et al. 1998)	Soil, Osaka, Japan	Red	Cocci	802, 856 ^b
<i>Roseateles</i> (Suyama et al. 1999)	Hanamuro River, Japan	Pink	Rod	800, 870 ^a
<i>Roseibium</i> (Suzuki et al. 2000)	Marine environments, east and west coasts of Australia	Pink	Rod	803–805, 863–873 ^a
<i>Roseinatronobacter</i> (Sorokin et al. 2000)	Soda Lake Gorbunka, Russia	Pink	Lemon-shaped	803–805, 870 ^a
<i>Roseivivax</i> (Suzuki et al. 1999a, b)	Saline Lake Clifton, Australia	Pink	Rod	803–805, 871–873 ^a
<i>Roseovarius</i> (Labrenz et al. 1999)	Saline Ekho Lake, Antarctica	Red, pink, light beige	Rod	799–802, 877–879 ^b
<i>Rubrimonas</i> (Suzuki et al. 1999a, b)	Saline Lake Clifton, Australia	Pink	Short rod	806, 871 ^a
<i>Rubritepida</i> (Alarico et al. 2002)	Fresh water hot spring, Hungary	Red	Short rod	ND
<i>Staleyia</i> (Labrenz et al. 2000)	Saline Ekho Lake, Antarctica	Beige to yellowish-brown	Short rod	800–802, 861–865 ^b

由于工业生产上嗜碱性细菌的需要, 寻找 AAPB 新种的工作被拓展到碱性湖泊中。碱性湖泊的一个重要特征就是存在着活跃的生物地球化学硫循环——还原态的硫被厌氧光合细菌和好氧化能自养细菌氧化。Sorokin 等人报道了从 Siberia 东南部的一个碱性湖泊中分离出一种好氧光合的 *Roseinatronobacter thiooxidans*^[12]。尽管这种菌不能象过去报道的 *Erythromicrobium hydrolyticum* 和 *Roseococcus thiosulfatophilus*^[3]那样通过不产氧光合作用来氧化硫化物, 但是它可以在好氧异养状态下氧化硫代硫酸盐。这种能力也许代表了从厌氧光合营养到好氧异养代谢的一种进化过渡的中间态。

最先的淡水中分离的 AAPB 代表种是从俄罗斯的 Baikal 湖附近一个热泉中的蓝细菌的生物膜上得到的^[3], 它们归为以下新属: *Sandaracinobacter*、*Erythromonas*、*Erythromicrobium* 和 *Roseococcus*。淡水热泉依然是分离 AAPB 新种的重要来源, 近几年来又鉴定出 3 个属于 AAPB 的新属。

在日本从不同的酸性水体中(酸性热泉和酸性矿排水系统)分离出四株嗜

酸的 AAPB^[13]。这些菌株被归类为新的种属——*Acidisphaera rubrifaciens*，而且它们可以产生少量的含 Zn 的叶绿素。这种现象过去也在 *Acidiphilium* 属的成员中报道过^[14]。但是 *Acidiphilium rubrifaciens* 相对与其它嗜酸的 AAPB 而言，它合成正常的含 Mg 的叶绿素作为主要的光合色素。

从日本 Hanamuro 河分离的细菌 *Roseateles depolymerans* 在含有聚环己烷碳酸盐的琼脂介质中生长时可以合成 BChl *a*。它同其它早先发现的 AAPB 成员在系统发育上是有显著区别，是第一个属于变形细菌 β 纲的 AAPB^[15]。这个发现揭示了 AAPB 的多样性远非最初想象的那样简单。

1.1.2 AAPB 的分类与进化 (Taxonomy and Phylogeny)

AAPB 的生长环境非常广泛，包括海洋、淡水湖和盐水湖、河流、土壤甚至深海热液口。1979 年，第一个被报道的 AAPB 的成员——*Erythrobacter longus* 在日本海湾被发现^[4]，随后具有好氧不产氧光合细菌特征的细菌种类大幅度增加，早期的研究将 AAPB 分为 2 个海洋属 *Erythrobacter* 和 *Roseobacter*，和 6 个淡水属 *Erythromicrobium*、*Roseococcus*、*Porphyrobacter*、*Acidiphilium*、*Erythromonas* 和 *Sandaracinobacter*，它们在进化上都属于 *Proteobacteria* 的 α 纲^[3]。后来在淡水中发现的 *Roseateles depolymerans* 属于 *Proteobacteria* 的 β 纲^[15]，因此拓展了 AAPB 的多样性。随着研究工作的深入，不断有新的 AAPB 种类被发现，例如 *Acidisphaera*、*Citromicrobium*、*Roseibium*、*Roseinatronobacter*、*Roseiviva*、*Roseovarius*、*Rubrimonas*、*Rubritepida* 和 *Staleyia* 等。目前，AAPB 可分为 7 个淡水属 (*Sandaracinobacter*，*Erythromonas*，*Erythromicrobium*，*Roseococcus*，*Porphyrobacter*，*Acidiphilium* 和 *Roseateles*)，6 个海洋属 (*Erythrobacter*，*Roseobacter*，*Citromicrobium*，*Rubrimonas*，*Roseovarius* 和 *Roseivivax*) 和 2 个土壤属 (*Craurococcus* 和 *Paracraurococcus*)^[6] (表 1-2)。

表 1-2 AAPB 种的主要特性

Table.1.2 Major properties of the aerobic phototrophic species

Species	Phylogeny (subclass)	Color	Carotenoid in vivo peaks (nm)	Bchl in vivo peaks (nm)	Cell shape and size (μm)	DNA G+C content (mol%)	Place of isolation
<u>Freshwater:</u>							
<i>Sandaracinobacter sibiricus</i>	α-4	yellow-orange	424, 450, 474	800, 867	Thin, long rods (0.3-0.5x1.5-2.5)	68.5	Russia, hot temperature spring bacterial mat
<i>Erythromonas ursincola</i>	α-4	Orange-brown	430, 458, 485	800, 867	Ovoid (0.8-1.0x1.3-2.6)	65.4	Russia, Southern Kurily, hot temperature spring cyanobacterial mat
<i>Erythromicrobium ramosum</i>	α-4	red-orange	466, 478	798, 832, 868	rods branched (0.7-1.0x1.6-2.5)	64.2	Russia, warm water spring
<i>ezovicum</i>	α-4	red-orange	466, 478	798, 836, 868	long bacilli (0.6-0.8x2.7-2.8)	62.5	alga-bacterial mat
<i>hydrolyticum</i>	α-4	red-orange	466, 478	798, 838, 868	rods, branched (0.7-1.1x1.8-2.5)	65.2	
<i>Roseococcus thiosulfatophilus</i>	α-1	pink-red	482, 510, 538	800, 858	coccoid (0.9-1.3x1.3-1.6)	70.4	Russia, hot temperature spring, cyanobacterial mat
<i>Porphyrobacter neustonensis</i>	α-4	orange-red	464, 491	799, 869	pleomorphic (0.4-0.8x1.1-2.0)	65-66	Australia, subtropical pond, water surface
<i>tepidarius</i>	α-4	orange	460, 494	800, 870	ovoid (0.5-0.7x0.8-1.4)	65	Japan, brackish hot spring
<i>Acidiphilium cryptum</i>	α-1	Pink	n.a.	n.a.	Rods (0.3-1.2x0.6-4.2)	67.3	Acid mineral environment
<i>rubrum</i>	α-1	Pink-red	465, 492	792, 864	Rods (0.6x2.0)	63.2	Acid mine drainage
<i>multivorum</i>	α-1	Pale pink	525	n.a.	Rods (0.5-0.9x1.5-3.8)	66.2-66.3	
<i>Roseateles depolymerans</i>	β	pink	482, 515, 550	800, 870	Rods (0.5x2.0)	66.2-66.3	Japan, river water
<u>Seawater:</u>							
<i>Erythrobacter longus</i>	α-4	Orange	470	800, 869	Rods (0.4-0.5x1.0-5.0)	60-64	Japan, high-tidal seaweeds
<i>litoralis</i>	α-4	Red-orange	437, 461, 488	800, 868	Rods (0.2-0.3x1.0-1.3)	67	The Netherlands, marine cyanobacterial mats
<i>Roseobacter litoralis</i>	α-3	Pink	510	806, 868	Ovoid rod (0.6-0.9x1.0-2.0)	59.6 ± 0.5	Japan, high tidal seaweeds
<i>denitrificans</i>	α-3	pink	510	806, 868	Ovoid rod (0.6-0.9x1.0-2.0)	56.3-58.1	
<i>Citromicrobium bathyomarinum</i>	α-4	Citron yellow	433, 457, 487	800, 867	Extremely pleomorphic	67.5	Juan de Fuca Ridge, Northeastern Pacific, deep ocean hydrothermal vent environment
<i>Rubrimonas cliftonensis</i>	α-3	pink	n.a.	806, 871	Rods (1.0-1.5x1.2-2.0)	74.0-74.8	Australia, West Coast, saline lake water
<i>Roseovarius tolerans</i>	α-3	Pink-red	Around 510	800, 878	Rods (0.7-1.0x1.1-2.2)	62.2-63.8	East Antarctica, heliothermal meromictic Ekho Lake
<i>Roseivivax halodurans</i>	α-3	Pink	n.a.	803, 873	Rods (0.5-1.0x1.0-5.0)	64.4	Australia, West Coast, charophytes of the saline lake
<i>halotolerans</i>	α-3	pink	n.a.	805, 871	Rods (0.5-1.0x1.0-5.0)	59.7	Australia, West Coast, epiphytes on the stromatolites
<u>Soil:</u>							
<i>Craurococcus roseus</i>	α-1	pink	n.a.	800, 872	Coccus (0.8x2.0)	70.5	Japan, soil
<i>Paracraurococcus ruber</i>	α-1	red	n.a.	802, 856	Coccus (0.8x1.5)	70.3-71.0	Japan, soil

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库